

基于特征区域划分的文物碎片自动匹配算法

赵夫群¹, 耿国华²

(1. 西安财经大学信息学院, 陕西西安 710100; 2. 西北大学信息科学与技术学院, 陕西西安 710127)

摘要: 在破损文物虚拟复原过程中, 碎片匹配是重要研究内容之一, 而传统几何驱动匹配算法对断裂面重叠率较低碎片的匹配误差较大, 因此针对具有一定厚度的文物, 本文提出一种基于特征区域划分的文物碎片自动匹配拼接算法. 首先提取文物碎片的断裂面, 并在断裂面上点的局部区域内构造法向量特征, 计算断裂面的特征点和特征点集; 然后将特征点集划分为多个小规模点云区域, 并通过区域匹配将碎片断裂面初步对齐; 最后利用基于阈值约束的迭代最近点 (Iterative Closest Point, ICP) 算法对特征点进行精确对齐, 从而实现碎片的最终匹配. 实验结果表明, 该基于特征区域划分的文物碎片匹配算法的时间效率和匹配精度, 比多数已有算法至少可以分别提高 10% 和 20%, 适用于低重叠断裂面的文物碎片匹配.

关键词: 碎片匹配; 特征点; 区域划分; 阈值约束; 迭代最近点

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)06-1436-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20201236

Automatic Matching Algorithm of Cultural Relic Fragments Based on Feature Region Division

ZHAO Fu-qun¹, GENG Guo-hua²

(1. School of Information, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an, Shaanxi 710100, China;

2. School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: In the process of virtual restoration of damaged cultural relics, fragments matching is one of the important research contents. The traditional geometric driven matching algorithms have large matching error for fracture surfaces with low overlapping rate, thus aiming at cultural relics with certain thickness, an automatic matching and splicing algorithm of cultural relics fragments based on feature region division is proposed. Firstly, the fracture surfaces of fragments are extracted, normal vector features are constructed in the local region of the points on the fracture surface to obtain the feature points and feature point sets of the fracture surfaces; secondly, each feature point set is divided into several small-scale point cloud regions, and the fragment fracture surfaces are aligned by region matching; finally, the iterative closest point (ICP) algorithm based on threshold constraint is used to further accurately align the fracture surfaces, so as to achieve the final matching of cultural relic fragments. The experimental results show that the time efficiency and matching accuracy of the proposed algorithm are at least 10% and 20% higher than those of many existing algorithms, respectively, and it is suitable for the matching of cultural relic fragments with low overlapping fracture surfaces.

Key words: fragments matching; feature point; region division; threshold constraint; iterative closest point

1 引言

随着 3D 扫描技术的日趋成熟, 得到文物的精确的三维模型坐标已经非常容易, 而如何将破损文物进行修复和展示则逐渐成为 3D 建模的关键. 传统的文物修复主要采用手工方式实现, 不仅修复速度慢、准确率

低、可逆性差, 而且容易造成二次破坏、数字化展示困难等问题^[1,2]. 因此, 利用计算机技术可以高速、便捷、无破坏地实现文物虚拟复原, 提高文物修复的效率和准确率, 并以虚拟复原指导文物实体复原, 对文物数字化保护和展示有着至关重要的意义.

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2021-02-28; 责任编辑: 王天慧

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61731015); 陕西省自然科学基金 (No.2021JQ-765); 陕西省哲学社会科学重大理论与现实问题研究项目 (No.2021ND0141); 西安财经大学科研计划 (No.20FCJH002)

碎片匹配是文物虚拟复原的重要研究内容之一,通过碎片匹配可以将文物碎片进行对齐拼接,为后续的碎片融合和虚拟展示提供技术支持.碎片匹配算法主要分为两大类:一类是无特征的碎片匹配,另一类是基于特征的碎片匹配.其中,基于特征的碎片匹配算法的应用更为广泛,如点特征、线特征、法线和曲率特征等.Ouyang等^[3]利用特征点实现碎片匹配,但效率较低、稳定性较差;Patel^[4]提出基于改进 SURF 的匹配算法,可以提高匹配速度,但对低重叠点云的匹配误差较大;周光兵等^[5]提利用图像灰度值实现 3D 刚性匹配,可以获得较高的匹配精度;廖梦怡等^[6]利用投影角点检测算法实现点云匹配,可以有效提高匹配精度;陈宝华等^[7]提出一种稠密三维点云与图像的匹配算法,实现了不同视场图形的匹配问题;任明荣等^[8]提出一种三维模型匹配的条件随机场算法,有效提高了匹配精度;Xu等^[9]提出基于几何特征向量的点云匹配算法,可以降低耗时,提高鲁棒性和可靠性;Shi等^[10]提出一种基于轮廓特征的特征点云匹配算法,但是该算法对轮廓特征破损严重碎片模型的匹配效果不佳;Wu等^[11]提出一种基于距离误差评价高密度点云匹配算法,但是对低重叠率点云的匹配精度不高;Yan等^[12]提出一种基于遗传算法(Genetic Algorithm, GA)的点云匹配算法,可以避免陷入局部最优解,但同样不适用于低重叠点云匹配.

以上基于特征的匹配算法均存在一定的问题,如:匹配精度低,收敛速度慢;约束条件过于严格,容易造成局部最佳匹配;花费大量时间在无用的匹配上;重叠比例较低点云的匹配效果不佳.鉴于此,针对文物的点云模型,本文提出一种基于特征区域划分的匹配算法,通过获取点云特征点并对特征点集进行区域划分以降低匹配规模,同时提高点云区域的重叠率,从而达到点云快速精确匹配的目的,提高低重叠断裂面文物的匹配精度.

2 特征点提取

对于待匹配的文物碎片,首先采用基于法矢的断裂面分割算法^[13]提取其断裂面,然后提取断裂面上的特征点并对其进行区域划分,由此提高低重叠断裂面的匹配精度和速度.

假设某一断裂面 φ_1 对应的点云模型为 P ,对于其上任意一点 p ,以圆心为 p 、半径为 r 的球形区域内的点来构建协方差矩阵 C ,并求解该协方差矩阵 C 的特征向量和特征值,其中最小特征值对应的特征向量就是点 p 的法向量.

构建点 p 及其邻域内点的协方差矩阵 C 为

$$C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (p_i - \bar{p}) \cdot (p_i - \bar{p})^T \quad (1)$$

$$C \times v_j = \lambda_j \cdot v_j, \quad j \in \{1, 2, 3\} \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, m 表示以 p 为圆心、 r 为半径的邻域内点的数量; \bar{p} 表示该邻域的质心; p_i 是 p 邻域内的点; λ_j 表示协方差矩阵 C 的特征值; v_j 表示特征值 λ_j 对应的特征向量.当特征值最小时,将其所对应的特征向量作为点 p 在该邻域下的法向量 n .

假设点 p 在半径 r_1 和 r_2 ($r_1 \neq r_2$)邻域下的法向量分别为 n_1 和 n_2 .由于在不同的半径下邻域曲面的变化程度不同,因此两个方向量 n_1 和 n_2 之间必然存在角度偏差,且角度偏差越大,表示曲面变化越剧烈.通过计算两个法向量 n_1 和 n_2 间夹角余弦来设定阈值 ε_1 ,以提取特征点,即

$$\frac{n_1 \cdot n_2}{|n_1| \cdot |n_2|} < \varepsilon_1 \quad (3)$$

式(3)中,阈值 ε_1 的值要根据具体实验情况来确定.对于点云 P 如果其外表面法向量变化较大,则需要提取的特征点较多,那么 ε_1 的值要设置得大一些,否则设置得小一些,但 ε_1 的值不能大于符合式(3)的最大值.

对于两个待匹配的断裂面 φ_1 和 φ_2 ,假设其对应的点云模型分别为 P 和 Q ,利用上述特征点提取方法对其进行特征点提取,得到的特征点集分别为 P' 和 Q' .接下来对特征点集 P' 和 Q' 进行区域划分,为后续区域匹配提供数据基础.

3 基于区域划分的初始匹配

3.1 特征点区域划分

本文以基于欧氏距离的Voronoi图^[14]作为特征点集的区域划分依据.以特征点集 P' 为例,计算其中任意一点 p' 的基于欧氏距离的Voronoi图,将特征点集 P' 划分成一系列互不相交的区域 $\{U_i\}_{i=1}^M$, M 表示特征点集 P' 的区域划分数目.

采用同样方法,将特征点集 Q' 也划分成一系列互不相交的区域,记为 $\{V_j\}_{j=1}^N$, N 表示特征点集 Q' 的区域划分数目.在实际应用中,通常将区域划分数目设置为1~20个.物体的形状特征越复杂,点云重叠比例越低,区域划分数目也就越大.当区域划分数目等于1时,点云区域配准就退化为一个全局配准问题.

3.2 区域匹配

通过对特征点集 P' 和 Q' 进行区域划分,得到两个相应的区域划分集合 $\{U_i\}_{i=1}^M$ 和 $\{V_j\}_{j=1}^N$,接下来采用

4PCS算法^[15]对区域 U_i 和 V_j 进行两两匹配,以实现文物碎片断裂面的初步对齐.由于4PCS算法利用点云 P' 上的四个共面点集作为基础集合 B ,然后在点云 Q' 上迅速找到所有与 B 近似全等的包含四个点的子集,从而实现区域.该算法利用四个点即可实现两个特征区域的匹配,因此具有较高的匹配速度,从而实现特征点集的粗匹配.

假设区域匹配后得到的一系列刚体变换为 $\{\mathbf{T}_i\}_{i=1}^{MN}$,可将其线性组合为

$$\mathbf{T} = \left\{ \mathbf{T}_i \right\}_{i=1}^L = \sum_{i=1}^L \omega_i \mathbf{T}_i / \sum_{i=1}^L \omega_i \quad (4)$$

式(4)中, $L=MN$; ω_i 表示线性组合系数, $i=1,2,\dots,L$.

在理想情况下, ω_i 的非零元素集合所对应的区域匹配程度会比较高,所对应的刚体变换与真实刚体变换是最接近的.线性组合系数 ω_i 通过最大化能量函数 $E(\boldsymbol{\omega})$ 来计算,计算式为

$$\begin{cases} E(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \omega_i \omega_j c_1(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j) c_2(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^L \omega_i^2 = 1, \omega_i \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $\boldsymbol{\omega} = \{\omega_i\}_{i=1}^L$ 表示待求解的组合系数; $c_1(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j)$ 表示可信性信息,表示它们是真实全局刚体变换的可能性,定义为 $c_1(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j) = \phi_i \phi_j$, ϕ_i 表示两个区域的匹配程度.

通常,可信性信息 $c_1(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j)$ 越大,刚体变换 \mathbf{T}_i 和 \mathbf{T}_j 是真实全局刚体变换的可能性就越大.而一致性信息 $c_2(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j)$ 则反映了刚体变换 \mathbf{T}_i 和 \mathbf{T}_j 的相似性,当刚体变换 \mathbf{T}_i 和 \mathbf{T}_j 接近时, $c_2(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j)$ 就比较大.定义 $c_2(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j)$ 为

$$c_2(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j) = \exp\left(-\frac{d(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j)}{\sigma^2}\right) \quad (6)$$

式(6)中,参数 σ 是一个大于0的实数,用来控制可信性和一致性信息的相对重要程度.

参数 σ 的值越大,一致性信息所起的作用就越大.当两个待匹配断裂面的重叠区域较小并且重叠区域内的特征比较明显时,需要依靠该特征区域来恢复全局变换, σ 的取值应该较小;反之, σ 的取值应该较大.在实际实验中,配准结果对 σ 的取值默认设置为1.0即可. $d(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j)$ 表示刚体变换 \mathbf{T}_i 和 \mathbf{T}_j 的距离,采用标准化的欧氏距离计算,即

$$d(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^3 \frac{(\theta_k^i - \theta_k^j)^2}{\sigma_{\theta_k}^2} + \sum_{k=1}^3 \frac{(t_k^i - t_k^j)^2}{\sigma_{t_k}^2}} \quad (7)$$

式(7)中, θ_k^i 表示刚体变换 \mathbf{T}_i 的三个绕坐标轴旋转的角度, t_k^i 表示刚体变换 \mathbf{T}_i 的三个沿坐标轴方向的偏移量, σ_{θ_k} 表示旋转角度的标准差, σ_{t_k} 表示偏移量的标准差, $k=1,2,3$.

接下来构造信息矩阵 \mathbf{A} ,其中 $A_{ij} = c_1(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j) c_2(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j)$,那么式(5)可以转化为

$$\begin{cases} E(\boldsymbol{\omega}) = \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{A} \boldsymbol{\omega} \\ \text{s.t. } \|\boldsymbol{\omega}\|_2 = 1, \boldsymbol{\omega} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

由于矩阵 \mathbf{A} 是对称的,因此它的最大特征值所对应的特征向量是 $\boldsymbol{\omega}$,最大化能量函数为 $E(\boldsymbol{\omega})$.根据Perron-Frobenius定理^[16], $\boldsymbol{\omega}$ 的所有分量具有相同的符号,因此可以选择合适的 $\boldsymbol{\omega}$ 使得它的各个分量都是正数,那么该 $\boldsymbol{\omega}$ 就是需要求解的最优组合系数.

刚体变换 \mathbf{T} 可分解为一个 3×3 旋转矩阵 \mathbf{R} 和一个 3×1 平移向量 \mathbf{t} .对于平移向量 \mathbf{t} ,直接平移计算即可.而对于旋转矩阵 \mathbf{R} ,采用四元数法^[17]来计算,即

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式(9)中, $q_0 \geq 0, q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$.

通过求解下面的约束优化问题得到 \mathbf{R} ,即

$$\begin{cases} \min_{q_0, q_1, q_2, q_3} \|\mathbf{R}^* - \mathbf{R}\|_F^2 \\ \text{s.t. } q_0 \geq 0, q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1 \end{cases} \quad (10)$$

通过计算旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} 即可求得刚体变换 \mathbf{T} ,实现特征点集 P' 和 Q' 的初始配准.最后,采用一种基于阈值约束的改进ICP算法实现点云精确配准.

4 基于阈值约束ICP的精确匹配

ICP算法通过不断迭代来求解两组点云之间的刚体变换,每次迭代都会求解点云变换矩阵,使得通过该矩阵变换得到的点云与目标点云对之间空间距离最小^[18].该算法具有较高的匹配精度,但耗时较长,且要求待匹配点云存在包含关系.鉴于此,在碎片断裂面精匹配阶段,本文采用一种基于阈值约束的ICP算法^[19]将特征点集 P' 和 Q' 进行进一步匹配.

采用该基于阈值约束的ICP算法对 P' 和 Q' 精确匹配的具体步骤如下.

(1)设置初值:旋转矩阵 \mathbf{R}_0' ,平移矢量 \mathbf{t}_0' ,迭代次数 $k=1$.

(2) 计算目标函数 F_k , 计算式为

$$F_k = \sum_{i=1}^M \|\mathbf{R}'_k P_i^{k-1} + \mathbf{t}'_k - Q'_i\| \quad (11)$$

式中, \mathbf{R}'_k 表示第 k 次的旋转矩阵, \mathbf{t}'_k 表示第 k 次的平移向量, P_i^{k-1} 表示第 k 次变换前的目标特征点集, Q'_i 表示表示参考特征点集.

(3) 利用 KD 树算法^[20] 搜索点云中点的最近邻点, 从而得出参考特征点集 Q'_i 和目标特征点集 P_i^{k-1} 中的距离最近对应点.

(4) 计算第 i 个匹配点对的欧氏距离 d_i^k 和欧氏距离偏差 Δd_i^k , 计算式分别为

$$d_i^k = \|Q'_i - P_i^{k-1}\| \quad (12)$$

$$\Delta d_i^k = \max(d_i^k) - \min(d_i^k) \quad (13)$$

式(13)中, $\max(d_i^k)$ 表示最大偏差; $\min(d_i^k)$ 表示最小偏差, $i = 1, 2, \dots, M$.

(5) 令 $j=0$, 设置欧氏距离初始阈值为 $d_{k0} = \frac{\Delta d_i^k}{2} + \min(d_i^k)$, 统计欧氏距离偏差值小于 d_{kj} 的点的数目 count.

(6) 判断 count 的值, 若 $\text{count} \geq 0.8M$, 则删除不满足条件的点, 转至步骤(7), 否则令 $j=j+1$, $d_{kj} = d_{kj-1} + \frac{\max(d_i^k) - \Delta d_i^k}{2}$, 转至步骤(5).

(7) 将此时的参考特征点集 Q'_i 和目标特征点集 P_i^{k-1} 代入式(11), 并利用奇异值分解法^[21] 使目标函数 F_k 最小, 求得此时的旋转矩阵 \mathbf{R}'_k 和平移矢量 \mathbf{t}'_k .

(8) 判断若 $|F_k - F_{k-1}| < \varepsilon$, 则停止迭代, 否则转步骤(3), 其中 $\varepsilon > 0$ 是一个预设的阈值.

通过以上对特征点集 P 和 Q' 的精确匹配, 即可达到文物碎片断裂面最终精确匹配拼接的目的.

5 匹配算法步骤描述

基于以上断裂面初始匹配和精确匹配方法, 该基

于特征区域划分的文物碎片匹配算法的具体步骤描述如下.

(1) 假设两个待匹配的文物碎片为 B_1 和 B_2 , 提取的其断裂面集合分别为 $F_1 = \{S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1n}\}$ 和 $F_2 = \{S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2m}\}$, n 和 m 分别表示碎片 B_1 和 B_2 所含断裂面的数目.

(2) 在断裂面集合 F_1 和 F_2 中, 任取两个未匹配过的断裂面 S_{1i} 和 S_{2j} , $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$, 提取断裂面 S_{1i} 和 S_{2j} 上的特征点, 得到特征点集特征点集 P' 和 Q' .

(3) 对特征点集 P' 和 Q' 进行区域划分和区域匹配, 从而将断裂面 S_{1i} 和 S_{2j} 初步对齐.

(4) 采用该基于阈值约束的 ICP 算法对特征点集 P' 和 Q' 进行进一步精确匹配, 从而实现断裂面 S_{1i} 和 S_{2j} 的进一步对齐.

(5) 判断断裂面 S_{1i} 和 S_{2j} 的匹配误差, 若小于给定阈值, S_{1i} 和 S_{2j} 匹配成功, 否则从断裂面集合 F_1 和 F_2 中取下一对未匹配过的断裂面 S_{1i} 和 S_{2j} , 重复步骤(2)到步骤(5), 直到找到可以成功匹配的两个断裂面或所有断裂面匹配完为止.

6 实验结果与分析

算法在 Visual studio 2010 环境下, Intel Core i7 3.33GHz 的 CPU、16GB 内存的 Windows 7 64 位 PC 机上进行实现. 实验数据是采用加拿大手持式 Handyscan3 D 激光扫描仪获取的兵马俑碎片的 obj 格式的 点云数据模型.

6.1 两个碎片的匹配

四组待匹配的兵马俑碎片如图 1 所示. 首先, 提取碎片断裂面上的特征点, 并对其进行区域划分; 然后采用 4PCS 算法进行区域匹配, 从而实现两个碎片断裂面的初始匹配; 最后采用基于阈值约束的 ICP 算法将特征点集进行精确匹配, 从而将断裂面进行最终匹配. 碎片初始匹配和精确匹配结果分别如图 2 和图 3 所示.



图 1 待匹配的兵马俑碎片

从图 2 和图 3 匹配结果可见, 该基于特征区域划分的碎片匹配算法通过提取特征点并将特征点集进行区域划分和匹配, 实现文物碎片的初始对齐, 再利用基于阈值约束的 ICP 算法实现碎片断裂面的最终精确匹配.

为了进一步验证该基于特征区域划分的碎片匹配算法的性能, 对于图 1 的四组文物碎片, 再分别采用 ICP 算法^[15]、文献[10]算法、文献[11]算法和文献[12]算法对其断裂面进行匹配, 匹配结果如表 1 所示.



图2 兵马俑碎片的初始匹配结果



图3 兵马俑碎片的最终匹配结果

从表1可见,该基于特征区域划分的匹配算法具有最高的匹配精度、最快的匹配速度.与ICP算法、文献[10]算法、文献[11]算法和文献[12]算法相比,该基于特征区域划分的匹配算法的匹配精度分别提高了约45%,35%,33%,22%,耗时分别降低了约26%,20%,16%,12%.

这是由于:ICP算法对碎片的相对初始位置要求较高,且要求两个待匹配的碎片断裂面间存在包含关系,因此匹配精度和速度较差,其时间复杂度为 $O(MN)$, M 和 N 分别表示两个待匹配点集的点数;文献[10]算法是一种基于X射线层析成像数据的点云匹配算法,并将其用于跟踪原始沙粒中破碎碎片,但是该算法利用轮廓特征进行匹配,对轮廓特征破损严重碎片模型的匹配效果不佳,其时间复杂度为 $O(N \log M)$;文献[11]

是一种基于距离误差评价的ICP算法,可以实现高密度点云的有效匹配,但是对低重叠率断裂面的点云模型的匹配并无明显优势,其时间复杂度为 $O(N \log M)$;文献[12]算法是一种结合GA和ICP的点云匹配算法,利用最大归一化匹配分数配准模型实现匹配,可以克服ICP算法依赖初始解和GA容易陷入局部最优解的缺点,但是该算法不能提高低重叠断裂面的局部重叠率,因此对重叠率较低碎片断裂面的匹配效果不佳,其时间复杂度为 $O(\max(M, N))$;而本文提出的基于特征区域划分的匹配算法不仅通过提取特征点大大降低了匹配的规模,而且通过区域划分大大提高了区域点云的重叠率,并通过在ICP算法中加入阈值约束提高了低重叠点云的匹配精度和速度,其时间复杂度为 $O(\log(\max(M, N)))$.由此可见,该基于特征区域划分的

表 1 五种算法的匹配结果

文物碎片分组	断裂面数目	匹配算法	平均匹配误差/mm	平均耗时/s
第一组	2,2	ICP算法	0.029 0	8.3
		文献[10]算法	0.024 8	7.8
		文献[11]算法	0.024 6	7.6
		文献[12]算法	0.021 1	7.3
		本文算法	0.016 6	7.0
第二组	4,3	ICP算法	0.032 9	9.4
		文献[10]算法	0.026 9	8.7
		文献[11]算法	0.026 8	8.2
		文献[12]算法	0.02 25	7.6
		本文算法	0.01 79	6.9
第三组	3,4	ICP算法	0.036 8	10.0
		文献[10]算法	0.030 5	9.2
		文献[11]算法	0.029 9	8.6
		文献[12]算法	0.024 7	8.0
		本文算法	0.020 2	6.9
第四组	3,3	ICP算法	0.029 7	8.8
		文献[10]算法	0.025 4	8.2
		文献[11]算法	0.025 2	8.0
		文献[12]算法	0.021 6	7.7
		本文算法	0.017 2	7.4

匹配算法是一种快速精确的文物碎片匹配算法,尤其对低重叠断裂面的碎片具有良好的匹配结果。

6.2 多个碎片的整体拼合

基于本文提出的两个碎片断裂面的匹配算法,接下来采用子图融合法^[10]实现多个兵马俑碎片的整体拼合。首先采用基于特征区域划分的碎片匹配算法将碎片进行两两匹配,确定碎片间的匹配关系,并根据该匹配关系确定所有碎片的匹配关系图;然后将满足匹配条件的碎片进行融合,直至所有的碎片融合为一个

整体为止。在融合的过程中允许回溯,即对于碎片融合过程中出现的无法融合的碎片可以进行重新融合。

以 G10-52 号兵马俑的拼合为例,该兵马俑含碎片 68 个,部分碎片如图 4 所示。该 68 个碎片可拼合成一个俑,不存在孤立的碎片。通常一个碎片的断裂面不止一个,因此一个碎片可能对应多个不同的匹配碎片,从而使得碎片间存在一对多的匹配关系。G10-50 号俑的所有碎片的整体拼合结果如图 5 所示。由图 5 可见,本文提出的碎片匹配算法可以实现兵马俑碎片断裂面的有



图 4 部分待拼合兵马俑碎片



图5 碎片整体拼合结果

效匹配.

7 结论

在文物碎片自动匹配拼接过程中,针对传统基于几何特征匹配算法不能有效解决断裂面重叠比例较碎片的匹配问题,本文提出了一种基于特征区域划分的碎片断裂面匹配算法.首先,通过构造特征点局部区域的法线向量特征,获得断裂面的特征点及特征点集;然后,将提取的特征点集划分为多个区域,并进行区域匹配以实现碎片初步匹配;最后,采用基于阈值约束的ICP算法实现断裂面的进一步的精确匹配,从而达到文物碎片匹配拼接的目的.该算法不仅可以大大减少匹配的数据规模,而且可以有效改善特征区域的重叠范围,其匹配的时间效率和匹配精度比许多传统算法至少可以分别提高10%和20%.但是,算法中没有考虑大量噪声对碎片匹配结果的影响,使用的数据模型都是低噪声的文物碎片点云数据模型.因此,在今后要继续研究更加通用的文物碎片匹配算法,着重加强噪声和点密度对匹配结果的影响,提高文物虚拟复原的正确率.

参考文献

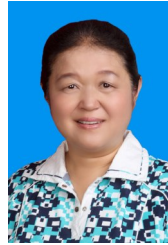
- [1] 邱兆文, 张田文. 文物三维重建关键技术[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2423-2427.
QIU Z W, ZHANG T W. Key technologies of 3D reconstruction of cultural relics[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2423-2427. (in Chinese)
- [2] ZHAO F Q, ZHOU M Q, GENG G H, et al. Rigid blocks matching method based on contour curves and feature regions[J]. IET Computer Vision, 2018, 12(1): 76-85.
- [3] OUYANG J L, LIU Y Z, SHU H Z. Robust hashing for image authentication using SIFT feature and quaternion zernike moments[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 76(2): 2609-2626.
- [4] PATEL M I, THAKAR V K, SHAH S K. Image registration of satellite images with varying illumination level using HOG descriptor based SURF[J]. Procedia Computer Science, 2016, 93: 382-388.
- [5] 周光兵, 宋华军, 吴玉兴, 等. 一种非特征的3D图像快速刚性配准方法[J]. 电子学报, 2018, 46(10): 2384-2390.
ZHOU G B, SONG H J, WU Y X, et al. Fast rigid 3D image registration method based on non feature[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(10): 2384-2390. (in Chinese)
- [6] 廖梦怡, 陈靛影, 徐如意, 等. 灰度值星型辐射投影角点检测算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(11): 2141-2149.
LIAO M Y, CHEN L Y, XU R Y, et al. Corner detection algorithm of gray value star radiation projection [J]. Journal of Computer Aided Design and Graphics, 2018, 30(11): 2141-2149. (in Chinese)
- [7] 陈宝华, 邓磊, 陈志祥, 等. 基于即时稠密三维重构的无人机视觉定位[J]. 电子学报, 2017, 45(6): 1294-1300.
CHEN B H, DENG L, CHEN Z X, et al. Visual location of UAV based on real-time dense 3D reconstruction[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(6): 1294-1300. (in Chinese)
- [8] 任明荣, 孟娟, 王普. MEMS-INS室内行人定位三维地图匹配算法[J]. 电子学报, 2021, 49(1): 111-116.

- REN M R, MENG J, WANG P. 3D map matching algorithm for indoor pedestrian location based on MEMS-INS [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(1): 111-116. (in Chinese)
- [9] XU J, CHEN R, CHEN H. Fast registration methodology for fastener assembly of large-scale structure[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(1): 717-726.
- [10] SHI Y, WANG W J, BAI X F. 3D dense reconstruction method based on multiple features[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2015, 9(5): 594-603.
- [11] WU M, WANG J. Registration of point cloud data for matching crushed sand particles[J]. *Powder Technology*, 2019, 347(10): 227-242.
- [12] YAN L, TAN J X, LIU H, et al. Registration of TLS and MLS point cloud combining genetic algorithm with ICP [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(4): 528-536.
- [13] 李群辉. 基于断裂面匹配的破碎刚体复原研究[D]. 西安: 西北大学, 2013.
LI Q H. Research on Restoration of Broken Rigid Body Based on Fracture Surface Matching[D]. Xi'an: Northwest University, 2013. (in Chinese)
- [14] XUE L, CGEN X, ZHAO J J, et al. A minimal rigid topology control algorithm based on Voronoi coverage and Delaunay triangulation in wireless sensor networks[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(10): 1570-1584.
- [15] FAN Y F, YAO X F, XY X F. A robust automated surface-matching registration method for neuronavigation [J]. *Medical Physics*, 2020, 47(7): 2755-2767.
- [16] HUTTNER A, MAI J F. Simulating realistic correlation matrices for financial applications: correlation matrices with the Perron-Frobenius property[J]. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2019, 89(2): 315-336.
- [17] JESUS N M, ROSA M F A, JOSE D J L, et al. Widely linear estimation for multisensor quaternion systems with mixed uncertainties in the observations[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 356(5): 3115-3138.
- [18] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [19] 石爱军, 白瑞林, 田青华, 等. 遗传算法结合自适应阈值约束的ICP算法[J]. *光学技术*, 2018, 44(1):63-68.
SHI A J, BAI R L, TIAN Q H, et al. Optimized ICP method combining genetic algorithm with adaptive threshold constraints[J]. *Optical Technique*, 2018, 44(1): 63-68. (in Chinese)
- [20] REDMOND S J, HENEGHAN C. A method for initialising the k-means clustering algorithm using kd-trees[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28(8): 965-973.
- [21] VINCENT G, DEREK B, ARNAUD G, et al. A constrained singular value decomposition method that integrates sparsity and orthogonality[J]. *PloS One*, 2019, 14(3): 32-45.

作者简介



赵夫群 女, 1982年生, 山东临沂人. 博士, 现为西安财经大学信息学院副教授. 主要研究方向为图形图像处理, 三维重建.
E-mail: fuqunzhao@126.com



耿国华 女, 1955年生, 山东莱西人. 现为西北大学信息科学与技术学院教授, 博士生导师. 主要研究方向为计算机辅助文物数字化复原.
E-mail: ghgeng@nwu.edu.cn